УДК 519.816

АГРЕГИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В ОЦЕНОЧНЫХ СИСТЕМАХ

Т. М. Леденева*, С. Л. Подвальный**

**Воронежский государственный университет*
***Воронежский государственный технический университет*

Поступила в редакцию 28.11.2016 г.

Аннотация. В статье рассматриваются основные классы операций агрегирования из семейства средних, их свойства и особенности использования для построения оценочных систем. Предложена методика для определения комплексной оценки комфортности помещения, отличительной особенностью которой является использование различных операций агрегирования для каждой из выделенных зон помещения.
Ключевые слова: оценочная система, функция агрегирования, стратегия агрегирования, весовой коэффициент.
Annotation. The article discusses the main classes of aggregation operations of the family average, their properties and features of use to build evaluation systems. A method for determining a comprehensive assessment of the room comfort. Its distinctive feature is the use of different aggregation operations for each of the selected room zones.
Keywords: grading system, the aggregation function, aggregation strategy, the weighting coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке большинства систем сбора и обработки информации, в частности, систем информационного мониторинга, информационно-аналитических систем возникает задача оценки состояния сложного объекта или процесса, которая структурно может быть представлена в форме многокритериальной (многоатрибутной) модели [6,11]. Наличие значительного количества показателей (признаков, атрибутов), характеризующих состояние объекта или процесса; разнородность шкал, в которых формируются оценки; необходимость учета возможных связей между показателями; неопределенность в выборе стратегии агрегирования – вот основные проблемы, которые должны быть решены при формировании оценочной системы [8,9], ключевую роль в которой играет выбор функции агрегирования, позволяющей построить обобщенную (интегральную, комплексную) оценку состояния сложного объекта или процесса.

Под *агрегированием* будем понимать переход от векторной оценки размерности n к векторной оценке меньшей размерности или к скалярной величине, которая называется *обобщенной* (групповой, комплексной, интегральной) *оценкой* объекта [10].

Пусть $U = \{u\}$ – заданное множество объектов; $P = \{P_1, ..., P_n\}$ – множество показателей (критериев, атрибутов); $P_i(u) = x_i$ – оценка объекта u по i-му показателю P_i в шкале S_i, так что $X = (x_1, ..., x_n) \in S_1 \times ... \times S_n$ – векторная оценка объекта u, компоненты x_i векторной оценки будем называть *частными оценками*. Для $u \in U$ требуется построить обобщенную (комплексную) оценку, характеризующую объект в целом по всем показателям или с учетом их большей части. Данная характеристика в дальнейшем используется в различных процедурах принятия решений.

Перечень показателей, используемых для формирования обобщенной оценки, формируется в рамках итерационной процедуры с привлечением экспертов. Процедура построения шкалы S_i предполагает формализацию показателя в виде переменной, принимающей значения в определенном множестве. Шкала показателя должна в полной мере учитывать специфику исходной информации.

Большинство оценочных систем ориентированы на информацию количественного типа, при этом показатели зачастую имеют различные единицы измерения. Для приведения их к «единому знаменателю» используются функции нормирования с учетом принципа [9], по которому устроен показатель. Некоторые полезные свойства линейных функций нормирования исследовались в [7]. Однако можно использовать нелинейные функции с различным направлением выпуклости, а также с точкой перегиба, что позволяет управлять отношением к риску или определять позицию оптимизма или пессимизма, если это экспертная оценка. Точка перегиба – это точка изменения приоритета значений показателя.

В статье рассматриваются основные классы операций агрегирования, относящиеся к семейству средних, выявляются их свойства и особенности использования в оценочных системах.

1. СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ ФУНКЦИЙ АГРЕГИРОВАНИЯ

Наиболее общий подход к агрегированию информации заключается в аксиоматическом определении функции (оператора) агрегирования, при этом можно выделить три основных стратегии [6,9]:

a) *конъюнктивная* стратегия, согласно которой обобщенная оценка не может быть лучше самой плохой из частных оценок;

b) *дизъюнктивная* стратегия, согласно которой обобщенная оценка определяется лучшей из частных оценок;

c) *компромиссная* стратегия, согласно которой обобщенная оценка занимает промежуточное положение между частными оценками, участвующими в агрегировании.

Дизъюнктивная стратегия характерна для оптимистической позиции ЛПР, в то время как ЛПР-пессимист имеет тенденцию в своих суждениях опираться на худшие свойства объектов, а, следовательно, на конъюнктивную стратегию.

Рассмотрим функцию взвешенного агрегирования общего вида

$$\alpha(u) = Agg(W, a),$$

где $u \in U$ – объект из заданного множества, $\alpha(u)$ – его обобщенная оценка, $X = (x_1, ..., x_n)$ – векторная оценка объекта u; $W = (w_1, ..., w_n)$ – вектор весовых коэффициентов.

В дальнейшем будем считать, что $\forall i = \overline{1,n}\left(x_i \in [0,1]\right)$.

Под n*-мерной операцией агрегирования* будем понимать отображение $A : [0,1]^n \to [0,1]$, которое векторной оценке X объекта $u \in U$ ставит в соответствие скалярную величину и удовлетворяет некоторым условиям, совокупность которых порождает определенный класс операций агрегирования.

Будем рассматривать класс *средних*, удовлетворяющих условию [3]

$$A(x_1, ..., x_n) \in \left[\min\{x_1, ..., x_n\}, \max\{x_1, ..., x_n\}\right].$$

Перечислим основные свойства, комбинация которых порождает различные семейства средних [3, 8].

Свойство 1 (граничные условия).

$$A(0, ..., 0) = 0, \quad A(1, ..., 1) = 1.$$

Свойство 2 (идемпотентность).

$$A(c, ..., c) = c.$$

Свойство 3 (монотонность). Для любой пары векторных оценок $X = (x_1, ..., x_n)$ и $Y = (y_1, ..., y_n)$ из $[0,1]^n$ таких, что $\forall i = \overline{1,n}(x_i \le y_i)$, выполняется неравенство $A(X) \le A(Y)$.

Свойство 4 (непрерывность). $A(x_1, ..., x_n)$ – непрерывная функция.

Свойство 5 (коммутативность). Для любой векторной оценки $X = (x_1, ..., x_n)$ имеет место $A(x_1, ..., x_n) = A\left(x_{p(1)}, ..., x_{p(n)}\right)$, где $(p(1), ..., p(n))$ – произвольная перестановка индексов $\{1, ..., n\}$.

Свойство 6. Пусть $x_i, y_i, x_i + y_i \in [0,1]$ для всех $i \in \{1, ..., n\}$, тогда

$$A(x_1 + y_1, ..., x_n + y_n) =$$
$$= A(x_1, ..., x_n) + A(y_1, ..., y_n).$$

Свойство 7.

$$A\left(\max\{x_1, y_1\}, ..., \max\{x_n, y_n\}\right) =$$
$$= \max\left\{A(x_1, ..., x_n), A(y_1, ..., y_n)\right\}.$$

Свойство 8.

$$A\left(\min\left\{x_1, y_1\right\}, ..., \min\left\{x_n, y_n\right\}\right) =$$
$$= \min\left\{A\left(x_1, ..., x_n\right), A\left(y_1, ..., y_n\right)\right\}.$$

Свойство 9 (функциональность).

$$A\left(f\left(x_1\right), ..., f\left(x_n\right)\right) = f\left(A\left(x_1, ..., x_n\right)\right).$$

Свойство 10. Пусть
$\tau_i^0\left(x_i\right) = A\left(0,...0, x_i, 0,...,0\right)$ для всех $i \in \left\{1,...,n\right\}$, тогда

$$\tau_i^0\left(\tau_i^0\left(x_i\right)\right) = \tau_i^0\left(x_i\right).$$

Свойство 11. Пусть
$\tau_i^1\left(x_i\right) = A\left(1,...1, x_i, 1,...,1\right)$ для всех $i \in \left\{1,...,n\right\}$, тогда

$$\tau_i^1\left(x \cdot y\right) = \tau_i^1\left(x\right) \cdot \tau_i^1\left(y\right) \text{ и } \tau_i^1\left(0\right) = 0$$
$$\text{для всех } i \in \left\{1,...,n\right\}.$$

Свойство 12 (однородность).

$$A\left(k \cdot x_1, ..., k \cdot x_n\right) = k \cdot A\left(x_1, ..., x_n\right).$$

Свойство 13 (переносимость).

$$A\left(x_1 + k, ..., x_n + k\right) = A\left(x_1, ..., x_n\right) + k.$$

Перечисленные свойства являются вполне естественными и отражают интуитивные требования к результату агрегирования.

Основные классы операторов агрегирования, принадлежащие семейству средних, представлены в табл. 1, в которой $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \left\{0\right\}$, $x_i \neq 0$ для всех $i \in \left\{1,...,n\right\}$ при $\alpha < 0$; $w_i > 0$ для всех $i \in \left\{1,...,n\right\}$ и $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$; $h : \left[0,1\right] \to \mathbb{R}$ – непрерывная монотонная (возрастающая или убывающая) функция, называемая аддитивным генератором [4, 5].

Заметим, что многие операции агрегирования из табл. 1 являются параметрическими. Конкретизация значений параметра α из (2) позволяет получить известные средние:

$$A_{-1}\left(x_1, ..., x_n\right) = \frac{n}{1/x_1 + ... + 1/x_n},$$
$$A_1\left(x_1, ..., x_n\right) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i.$$
$$A_{-\infty}\left(x_1, ..., x_n\right) = \min\left\{x_1, ..., x_n\right\},$$
$$A_{\infty}\left(x_1, ..., x_n\right) = \max\left\{x_1, ..., x_n\right\},$$

Заметим, что $A_{-1}\left(x_1, ..., x_n\right)$ – среднее гармоническое, а $A_1\left(x_1, ..., x_n\right)$ – среднее арифметическое; $A_{-\infty}\left(x_1, ..., x_n\right)$, $A_{\infty}\left(x_1, ..., x_n\right)$ реализуют соответственно конъюнкцию и дизъюнкцию в бесконечнозначной логике. Именно эти средние реализуют конъюнктивную и дизъюнктивную стратегии в «чистом виде».

Взвешенное среднее (3) называется аддитивной сверткой. Формула (6) определяет монотонную аналитическую ассоциативную среднюю. Среднюю называют ассоциативной [4], если она не меняется при подстановке в данную совокупность вместо любого числа ее членов их средней величины. Например, средняя геометрическая является ассоциативной средней, а средняя антигармоническая – не является.

В [7] исследуется представление (6) применительно к нечетким коммутативным и ассоциативным операциям. Полученные результаты могут использоваться для порождения ассоциативных (6) или квазилинейных средних (7). Средняя (4), по сути, обобщает формулу (3): операция сложения заменена на $\max$, а умножения – на $\min$. С другой стороны, операция $\max$ реализует дизъюнктивное агрегирование, учитывая лучшие свойства объектов, и тогда $\min\left\{w_i, x_i\right\}$ выполняет такое преобразование, при котором показателям с малым значением веса w_i ставится в соответствие малое значение агрегата $\min\left\{w_i, x_i\right\}$, что позволяет уменьшить влияние неважных показателей (атрибутов, критериев) на обобщенную оценку. При конъюнктивном агрегировании ситуация противоположная – существенное влияние на результат оказывают элементы с минимальными значениями оценок, тогда выполняется такое преобразование $x_i^{w_i}$, при котором неважные агрегаты получают больший вес. Заметим, что для $\max$ и $\min$ возможны другие преобразования аргументов [6].

Особенностью средних (1), (3)–(5), (7), (9) и (10) является наличие весов $W = \left(w_1, ..., w_n\right)$, с помощью которых учитывается «вклад» каждой частной оценки в обобщенную оценку, при этом вес отражает значимость соответствующего источника информации (критерия, показателя, атрибута). В настоящее время существует значительное количество методов, предназначенных для построения весовых коэффициентов и ориентированных

Таблица 1

Основные классы операций агрегирования		Свойства												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	*Взвешенное среднее порядка* α $S_\alpha(X,W)=\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i^\alpha\right)^{1/\alpha}$	+	+	+									+	
2	*Среднее порядка* α $A_\alpha(X)=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^\alpha\right)^{1/\alpha}$	+	+	+	+	+							+	
3	*Взвешенное среднее* $S(X,W)=\sum_{i=1}^{n} w_i x_i$	+	+	+	+		+						+	+
4	$MAX(X,W)=\max_i\left\{\min(x_i,w_i)\right\}$	+		+			+	+		+	+			
5	$MIN(X,W)=\min_i\left\{x_i^{w_i}\right\}$	+	+	+					+			+		
6	*Ассоциативная средняя* $F(X)=h^{-1}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h(x_i)\right]$		+	+	+	+								
7	*Квазилинейные средние* $F_W(X)=h^{-1}\left[\sum_{i=1}^{n} w_i h(x_i)\right]$		+	+										
8	*Средняя арифметическая* $A(X)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$		+	+	+	+	+						+	+
9	*Средняя взвешенная геометрическая* $G(X)=\prod_{i=1}^{n} x_i^{w_i}$			+	+	+						+	+	+
10	*Средняя взвешенная гармоническая* $H(X)=\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{w_i}{x_i}\right)^{-1}$		+	+	+								+	

на участие экспертов [11]. Известно [3], что различные операции, относящиеся к семействам средних, полезны при агрегировании несильно отличающихся данных, в то время, как для векторных оценок со значительным разбросом они не подходят. В случаях, когда первичной является важность значений частных оценок, применяются порядковые операторы взвешенного агрегирования [12–14] – OWA-операторы, которые агрегируют компоненты векторной оценки, упорядоченные определенным образом. Их особенностью является иная интерпретация весов.

n*-местным порядковым оператором взвешенного агрегирования* (OWA-оператором) называется отображение $\Phi:\left[[0,1]\times[0,1]\right]^n\to$ $\to[0,1]$, ассоциированное с вектором весовых коэффициентов $W\in[0,1]^n$, такое, что $\Phi(W,X)=\sum_{i=1}^{n} w_i x_{\sigma(i)}$, где $\sigma:\{1,...,n\}\to\{1,...,n\}$ – перестановка, такая, что $x_{\sigma(1)}\geq x_{\sigma(2)}\geq...\geq x_{\sigma(n)}$.

Обобщенная оценка, вычисленная на основе OWA-оператора, есть результат скалярного произведения вектора весов W на вектор, полученный из $(x_1,...,x_n)$ упорядочением элементов по невозрастанию. Обозначим

$b_i = x_{\sigma(i)}$, тогда $b = (b_1, ..., b_n)$ – это упорядоченный вектор x, и $\Phi(W, x) = \sum_{i=1}^{n} w_i b_i = (x, b)$.

Заметим, что если весовые коэффициенты в W упорядочены по убыванию или по возрастанию, то значение $\Phi(W, X)$ будет соответствовать максимальному (или минимальному) значению скалярного произведения векторов X и W. К основным алгебраическим свойствам OWA-оператора относятся коммутативность, идемпотентность, монотонность [6, 10], однако, данный оператор не является ассоциативным, а значит, к нему не применимы процедуры декомпозиции.

Аналогично представлению квазилинейных средних можно построить *квази* OWA *-операторы* вида [13]

$$\tilde{\Phi}(W, X) = h^{-1}\left(\sum_{i=1}^{n} w_i h(b_i)\right),$$

где $h : [0,1] \to \mathbb{R}$ – аддитивный генератор.

В табл. 3 представлены основные случаи аддитивных генераторов и соответствующих им операций агрегирования. Заметим, что квази OWA -оператор (2) обобщает понятие OWA -оператора, а (3) – аналог мультипликативной свертки.

Для классификации OWA -операторов вводятся различные числовые характеристики [10,13]:

$$orness(W) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(n-i)w_i,$$

$$andness(W) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(i-1)w_i,$$

$$ndisp(W) = -\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n} w_i \ln(w_i),$$

$$tradeoff(W) = 1 - \sqrt{\frac{n}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(w_i - {1}/{n}\right)^2}.$$

В табл. 2 представлены специальные случаи весовых коэффициентов.

В общем случае OWA -оператор реализует компромиссную стратегию агрегирования, при этом $andness(W)$ и $orness(W)$ определяют наличие у операции агрегирования конъюнктивных и дизъюнктивных свойств, а, следовательно, оценивают степень проявления конъюнктивной или дизъюнктивной стратегии соответственно. Различают следующую классификацию: если $andness(W) > 0.5$, то OWA -оператор называется *квазиконъюнкцией*; если $orness(W) > 0.5$, то OWA -оператор – *квазидизъюнкция*. Показатель $ndisp(W)$ представляет собой энтропию и показывает, насколько равномерно учитываются частные оценки. Заметим, что для любого фиксированного уровня $orness(W)$ (или $andness(W)$) и размерности n существует вектор весов W, на котором достигается максимальное значение энтропии $ndisp(W)$ [10].

Некоторые оценочные модели ориентированы на наличие компенсационных свойств оператора агрегирования, когда малые значения частных оценок по одному показателю компенсируются большими значениями оценок по другим показателям. Анализ семантики операторов показывает, что оператор $\min$ не обладает компенсационными свойствами, в то время как оператор $\max$ соответствует случаю полной компенсации, поэтому показатель $orness(W)$ также можно использовать для ха-

Таблица 2

W	$orness(W)$	$andness(W)$	$ndisp(W)$	$tradeoff(W)$	$\Phi(W, X)$
$\left(1, \underbrace{0, ..., 0}_{n-1}\right)$	1	0	0	0	$\max_i \{x_i\}$
$\left(\underbrace{0, ..., 0}_{n-1}, 1\right)$	0	1	0	0	$\min_i \{x_i\}$
$\left(\frac{1}{n}, ..., \frac{1}{n}\right)$	0.5	0.5	1	1	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$

Таблица 3

№	Генератор $h(x)$	Операции агрегирования $\Phi(W,X)$
1	$1-x$	$1-\sum_{i=1}^{n} w_i(1-b_i)$
2	$x/2$	$\sum_{i=1}^{n} w_i b_i$
3	$-\ln x$	$\prod_{i=1}^{n} b_i^{w_i}$
4	$-\ln(1-x)$	$1-\prod_{i=1}^{n}(1-b_i)^{w_i}$
5	$\dfrac{1-x}{x}$	$\left(1+\sum_{i=1}^{n} w_i \dfrac{1-b_i}{b_i}\right)^{-1}$
6	$\dfrac{x}{1-x}$	$\sum_{i=1}^{n}\dfrac{w_i b_i}{1-b_i} \Big/ \left(1+\sum_{i=1}^{n}\dfrac{w_i b_i}{1-b_i}\right)$
7	$\ln\left(\dfrac{\alpha-(\alpha-1)x}{x}\right)$	$\alpha\left((\alpha-1)+\prod_{i=1}^{n}\left(\dfrac{\alpha-(\alpha-1)b_i}{b_i}\right)^{w_i}\right)^{-1}$
8	$\ln\left(\dfrac{1+\beta x}{1-x}\right)$	$\left(\prod_{i=1}^{n}\left(\dfrac{1+\beta b_i}{1-b_i}\right)^{w_i}-1\right) \Big/ \left(\prod_{i=1}^{n}\left(\dfrac{1+\beta b_i}{1-b_i}\right)^{w_i}+\beta\right)$

рактеристики компенсационных свойств. Показатель *tradeoff* «отвечает» за риск, поскольку, по сути, представляет собой оценку отклонения вектора весов $(w_1,...,w_n)$ от вектора $\left(\frac{1}{n},...,\frac{1}{n}\right)$. Заметим, что перечисленные характеристики полностью определяются вектором весовых коэффициентов, поэтому, целенаправленное построение процедуры агрегирования, включая задание стратегии, уровня компенсационных свойств, отношения к риску, возможно на основе специальные методов построения весов [10, 14].

В [14] изложен метод построения вектора W с использованием функций квантификации, которые моделируют лингвистические кванторы (*большинство*; *как можно больше*; *по крайней мере*, *половина* и т. п.). По сути, лингвистический квантор определяет приближенную оценку того количества агрегируемых величин, которые в большой степени влияют на значение обобщенной оценки. Другими словами, функция квантификации формализует тот или иной принцип согласования при формировании обобщенной оценки.

2. ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ФОРМИРОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КОМФОРТНОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ

Системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха предназначены для создания и поддержания параметров микроклимата помещения в диапазоне определенных значений и являются достаточно энергоемкими. По некоторым оценкам расходы электроэнергии на эти системы могут доходить до 50–60 % от общего потребления энергетических ресурсов объекта. Поэтому крайне важно, чтобы эти средства использовались эффективно. Правильный расчет воздухообмена в помещении на этапе проектирования является ключевым в обеспечении эффективной работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Основными параметрами, оценивающим уровень комфорта/дискомфорта в помещении, являются следующие [1]: PMV – индекс комфортности по Фангеру, который основан на понятии теплоощущения человека; DR – параметр, характеризующий наличие сквозняка в помещении, и зависящий, в том числе, от степени турбулентности воздуха; PD_1 – параметр, оценивающий дискомфорт, вызванный градиентом температуры по высоте помещения; PD_2 – параметр, оценивающий дискомфорт, вызванный значением температуры в зоне пола; PD_3 – параметр, который оценивает дискомфорт, вызванный асимметрией теплового излучения. В [2] предложена нечеткая система, позволяющая в зависимости от значений параметров PMV, DR, PD_1, PD_2, PD_3 в каждой точке объема определить категорию комфортности A, B или C (табл. 4) помещения, при этом $A \succ B \succ C \succ D$, т. е. категория A имеет самый высокий приоритет, а C – самый низкий. Категория D соответствует дискомфорту.

Будем считать, что каждая из зон имеет свою значимость при проектировании системы вентиляции, однако могут быть и такие зоны, для которых особых требований не выдвигается. Очевидно, что, если зона имеет большой вес, то плотность контрольных точек в ней может быть большей, чем в той зоне, которая в меньшей степени влияет на комфортность помещения. По сути, каждая из зон представляет собой множество точек, каждая из которых имеет определенную категорию.

Пусть $Z^+ = \left\{Z_{i_1}^+, \ldots, Z_{i_{s_1}}^+\right\}$ – подмножество зон, к которым предъявляются требования, а $Z^- = \left\{Z_{i_1}^-, \ldots, Z_{i_{s_2}}^-\right\}$ включает те зоны, к которым требования не предъявляются, так что $Z^+ \cup Z^- = Z$ – множество всех зон, которые выделены в помещении, $s_1 + s_2 = s$ – их количество. Каждая из зон может быть отнесена только к одному классу Z^+ или Z^-.

Для вычисления комплексной оценки комфортности помещения предлагается формула

$$ComplexValue =$$
$$= \alpha \cdot Value\left(Z^+\right) + \left(1-\alpha\right) \cdot Value\left(Z^-\right),$$

где f, g – функции агрегирования для каждого типа зоны, с помощью параметра $\alpha \in [0,1]$ можно регулировать отношением к тем или иным зонам. Если $\alpha = 0.5$, то оба типа зон будут считаться одинаково значимыми для комплексной оценки; если $\alpha > 0.5$, то большую значимость при оценке проекта будут иметь зоны, для которых установлены требования по комфортности.

В класс Z^+ входят зоны Z_j^+ $\left(j \in \left\{i_1, \ldots, i_{s_1}\right\}\right)$, к которым предъявляются требования. Пусть $Z_j^+ = \left\{x_1^j, \ldots, x_{n_j}^j\right\}$ – множество точек, образующих зону Z_j^+, для каждой из которых с помощью нечеткой системы определена категория и известно требование к категории. Очевидно, что в этом случае оценка $f\left(Z_j^+\right)$ зоны Z_j^+ должна учитывать, выполнены ли или нет в каждой точке требования, поэтому положим $f\left(Z_j^+\right) = \dfrac{\sum_{l=1}^{n_j} \varepsilon_l^j}{n_j} \in [0,1]$, где $\varepsilon_l^j = 1$, если в точке

Таблица 4

$\lvert PMV \rvert$	DR	PD_1	PD_2	PD_3	Категория
< 0.2	< 10	< 3	< 10	< 5	A
< 0.5	< 20	< 5	< 10	< 5	B
< 0.7	< 30	< 10	< 15	< 10	C
≤ 2	≤ 100	≤ 75	≤ 60	≤ 100	D

$x_l^j \in Z_j^+$ значение категории не ниже требуемого, и 0 – иначе.

Если класс Z^+ является гетерогенным, т. е. каждая из зон $Z_j^+ \in Z^+$ имеет свой весовой коэффициент w_j $\left(\sum_{j=1}^{s_1} w_j = 1 \right)$, назначенный экспертом, то комплексная оценка характеризует в целом несоответствие предъявляемым требованиям и может быть представлена в виде

$$Value\left(Z^+\right) = Agg_1\left(f\left(Z_{i_1}^+\right), ..., f\left(Z_{i_{s_1}}^+\right)\right),$$

где в качестве операции $Agg_1(\cdot)$ целесообразно использовать различные средние взвешенные (в табл. 1 – 1, 3-5, 9-10), учитывая их свойства.

Если класс Z^+ является гомогенным, то важно определить принцип, согласно которому будет производиться агрегирования. Такой принцип может быть сформулирован следующим образом: *при агрегировании необходимо учитывать большинство (по крайней мере, половину, как можно больше,...) зон*. В этом случае с помощью функции квантификации, формализующей выбранный лингвистический квантор, определяется вектор весов по формуле, и для вычисления оценки применяется операция порядкового взвешенного агрегирования (OWA).

Для точек из класса Z^- требований не задано, однако каждая из зон $Z_l^- \in Z^-$ так же, как и предыдущем случае, может иметь свой вес v_l, причем $\sum_{l=1}^{s_2} v_l = 1$. При определения качества каждой зоны $Z_l^- = \left\{ y_1^l, ..., y_{n_l}^l \right\}$ будем считать, что чем больше точек, имеющих категории A или B, тем лучше. Поэтому в качестве оценки $g\left(Z_l^-\right)$ будем использовать относительную частоту появления точек с указанными категориями, т. е. $g\left(Z_l^-\right) = \frac{n_l^{(A)} + n_l^{(B)}}{n_l}$, где $n_l^{(A)}$, $n_l^{(B)}$ – количество точек, имеющих категорию A и B соответственно. Обобщенная оценка класса Z^- может быть вычислена на основе тех же рассуждений, что и предыдущая

$$Value\left(Z^-\right) = Agg_2\left(g\left(Z_{i_1}^-\right), ..., g\left(Z_{i_{s_2}}^-\right)\right).$$

Для реализации многовариантного подхода к обобщенной оценке комфортности помещения разработан программный комплекс

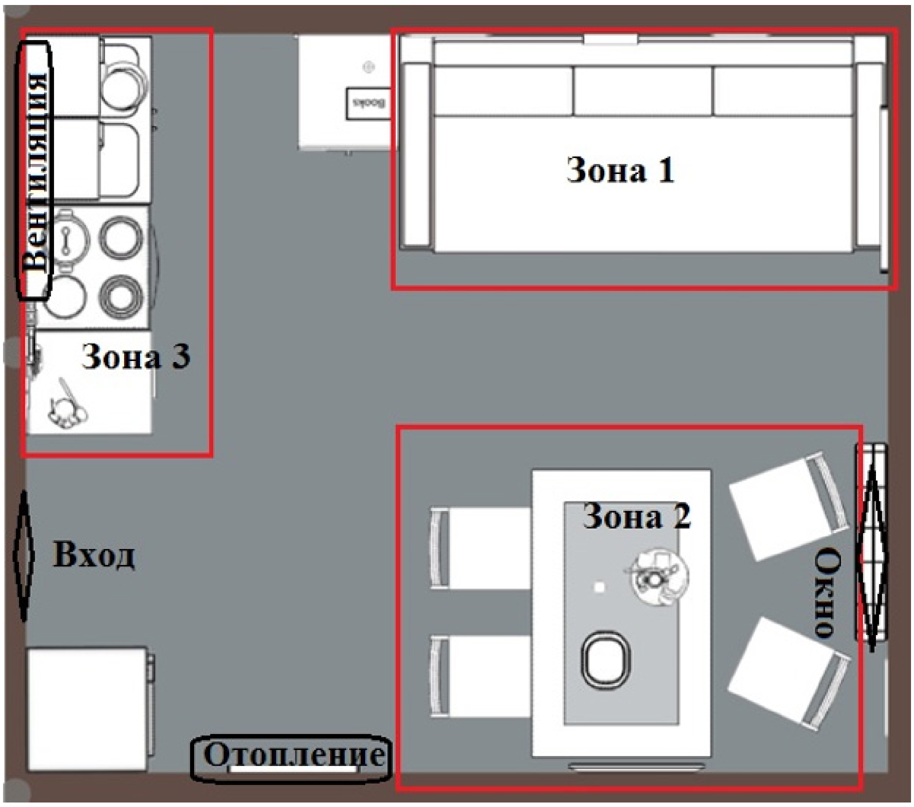

Рис. 1. План помещения с учетом систем вентиляции и отопления

ComplexValue на языке Java с использованием технологии JavaFX (разработчик – магистр Решетников А. А., магистерская программа «Интеллектуальные информационные технологии»). Входная информация включает: множество выделенных в помещении зон с определенным количеством точек; набор весов, характеризующих значимость каждой из зон. Выходная информация – комплексная оценка комфортности помещения в виде числа из $[0,1]$, при этом чем ближе оценка к 0, тем предпочтительнее проект.

На рис. 1 представлено помещение, в котором выделены наиболее значимые зоны.

Зона 1 – это зона отдыха, и поэтому к данной зоне требования чрезвычайно высоки (большая часть точек должна иметь категорию не ниже A). Зоне 2 соответствует обеденная зона, в данном случае требования также высоки, однако категория B допустима (будем считать, что процентное содержание точек с категориями A и B примерно одинаково). В кухонной зоне 3 для большинства точек допустима категория B. Для формирования обобщенной оценки в зонах 1 и 2 возьмем по 100 точек, в зоне 3 – 85 точек, в незначимой зоне – 75 точек. Таким образом, входной файл исходных данных представляет собой триста пятьдесят пять наборов параметров, характеризующих соответствующие точки помещения. Каждый набор содержит координаты точки в пространстве помещения, значение категории в данной точке (определяется нечеткой системой) и требование к ней. Программа позволяет настроить алгоритм, задав функции нормирования, стратегии агрегирования, параметры функции агрегирования и функции квантификации, метод вычисления весовых коэффициентов. Например, регулируя только степень значимости зон с помощью параметра α, можно получить различные результаты: при $\alpha = 0$ обобщенная оценка равна 0.906; при $\alpha = 1$ оценка – 0.123. Это говорит о том, насколько важно правильно выделить зоны и вычислить для них весовые коэффициенты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с многообразием функций агрегирования проблема выбора подходящей для конкретной задачи функции занимает центральное место, поскольку ее решение влияет на ключевые свойства оценочной системы, такие, как адаптивность, эффективность вычислений, учет типа исходных данных и стратегии агрегирования. Большое значение имеют параметрические формы функций агрегирования, так как за счет выбора подходящих значений параметров можно обеспечить гибкость системы и ее настройку на информационную среду конкретного пользователя. Преимуществами предложенной методики для формирования комплексной оценки комфортности помещения являются гибкость при выборе операции агрегирования и возможность учитывать требования к различным зонам помещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. – М. : Стандартинформ, 2011. – 48 с.

2. *Денисихина Д. А.* Разработка базы знаний для определения категории комфортности помещения / Д. А. Денисихина, Т. М. Леденева // Вестн. гражданских инженеров, 2014. – № 6(47). – С. 219–225.

3. *Джини К.* Средние величины / К. Джини. – М. : Статистика, 1970. – 448 с.

4. *Леденева Т. М.* Некоторые аспекты представления нечетких операторов отношением двух многочленов / Т. М. Леденева // Известия высших учебных заведений. Математика, 1997. – № 11. – С. 33–40.

5. *Леденева Т. М.* Моделирование процесса агрегирования информации в целенаправленных системах (Серия: Моделирования, Оптимизация и компьютеризация в сложных

системах, Кн. 8) // Т. М. Леденева. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 1999. – 155 с.

6. *Леденева Т. М.* Модели и методы принятия решений : учеб. пособ. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. – 189 с.

7. *Леденева Т. М.* Об исследовании треугольных норм с помощью функций нормирования / Т. М. Леденева // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика. – № 1, 2005. – С. 189–195.

8. *Леденева Т. М.* Аксиоматический подход к построению функций агрегирования для оценочных систем / Т. М. Леденева, Д. А. Денисихина // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – № 3. – С. 33–39.

9. *Леденева Т. М.* Моделирование оценочных систем на основе принципа многоальтернативности / Т. М. Леденева, С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии, 2014. – Т. 57. – № 3.1. – С. 155–161.

10. *Леденева Т. М., Тафинцева М.* Моделирование свойств порядковых операторов взвешенного агрегирования / Т. М. Леденева, М. Тафинцева // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика. – № 1, 2006. – С. 66–72.

11. *Петровский А. Б.* Теория принятия решений / А. Б. Петровский. – Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.

12. *Yager R. R.* Ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 18(1988), pp.183–190.

13. *Yager R. R.* Families of OWA operators, Fuzzy Sets and Systems, 59 (1993), pp. 125–148.

14. *Yager R. R.* Quantifier guided aggregation using OWA operators, International Journal of Intelligent Systems, 11 (1996), pp. 49–73.

Леденева Татьяна Михайловна – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой вычислительной математики и прикладных информационных технологий, Воронежский государственный университет.
E-mail: ledeneva@yandex.ru

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет.
E-mail: spodvalny@yandex.ru

Ledeneva T. M. – Doctor of Technical Sciencies, Professor, Computational Mathematics and Applied Computer Science, faculty of Applied Mathematics, Computer sciences and Mechanics, and Mechanics, Voronezh State University.
E-mail: ledeneva-tm@yandex.ru

Podvalniy S.L. – Doctor of Technical Sciencies, Professor, Head of the Department of automated and computer systems, Voronezh State Technical University.
E-mail: spodvalny@yandex.ru